대한기계학회 2001년도 추계학술대회논문집 B pp. 235~240 KSME 01F184

초음파 가진에 따른 열전달 향상에 관한 연구

윤정환*· 오율권**· 차경옥***

An Experimental Study of enhancing heat transfer by Ultrasonic Vibration

Joung-Hwan Youn, Yool-Kwon Oh, Kyung-Ok Cha

Key Words: Ultrasonic Vibration(초음파진동), Phase Change Material(PCM, 상변화물질), Phase Change Heat Transfer(상변화열전달), Natural Melting(자연용융), PIV

Abstract

This study presents experimental work on phase change heat transfer, in order to increase heat transfer rate, ultrasonic vibrations were introduced. Solid-liquid phase change occurs in a number of situations of practical interest. This study reveal that ultrasonic vibrations accompany the effects like agitation, acoustic streaming, cavitation, and oscillating fluid motion. Such effects are a prime mechanism in the overall melting process when ultrasonic vibrations are applied. Some common examples include the melting of edible oil, metallurgical process such as casting and welding, and materials science applications such as crystal growth. Therefore, this study presented the effective way to enhance phase change heat transfer.

기 호 설 명

h ; 열전달계수
Δh_f ; 잠열 [kJ/kg]
t ; 시간 [hour]
g ; 중력가속도 [m/sec^2]
q" ; Heat Flux (열유속) [kcal/hrm^2]
u, v ; 수평 · 수직방향의 속도
C_P ; 열용량 [kJ/kg℃]
H ; 파라핀의 높이 (특성길이) [㎝]
K ; 액상파라핀의 열전도율 [J/m℃sec]
T ; 온도 [℃]
X,Y : 무차원 직교좌표

F_o : Fourier 수, $\frac{\alpha t}{H^2}$

Nu : Nusselt 수, $\frac{q'' H}{\Delta T K}$

Pr : Prandtl 수, $\frac{\upsilon}{\alpha}$

Ra : Rayleigh 수, $\frac{g\beta\Delta T H^3 \mathrm{Pr}}{\upsilon^2}$

Ra* : 변형 Rayleigh 수, $\frac{g\beta q'' H^4 \mathrm{Pr}}{K\upsilon^2}$

Ste : Stefan 수, $\frac{C_p \Delta T}{\Delta h_f}$

Ste* : 변형 Stefan 수, $\frac{C_p q'' H}{K \Delta h_f}$

그리스 문자

Γ : 무차원 액-고상 인터페이스의 위치

* 조선대학교 대학원
** 조선대학교 기계공학부
*** 명지대학교 기계공학과

α : 열확산율
β : 열체적팽창계수
θ : 무차원온도
ν : 동점성계수
τ : 무차원시간

하첨자

f : 용융상태
h : 히터표면
i : 액체영역
s : 고체영역

1. 서 론

초음파진동(Ultrasonic Vibrations)을 자연용융상태에 가하여 열전달을 향상시킬수 있다는 것과 초음파 진동이 용해 속도에 영향이 있다는 것을 보여준 Park[1]은 상변화 물질에 열전달을 촉진시켜 상변화가 일어나고 용해시간, 소요에너지량이 감소 될 수 있다는 것을 보여주었다. 상변화 열전달은 식용오일의 용융, 금속의 주조 및 야금, 축열시스템등 응용분야가 산업전반에 걸쳐서 활발하게 이루어 지고 있음에도 불구하고 용융내지는 상변화를 촉진시키는 방법과 열전달을 증진시키는 방법의 자연대류 범위내에서 이루어지고 있으며 주로 벽면열원의 온도하에 의존하고 있는 실정이다. 이에 본 연구에서는 초음파를 가진 방향을 각각 나누어 상변화물질의 용융현상을 조사하고, PIV system과 열화상카메라를 이용하여 가시적으로 용융현상을 분석하였다.

2. 이 론 해 석

2.1 지배방정식

용기내의 액상파라핀의 전달현상을 표현하기 위해서는 x,y 방향의 연속방정식 및 운동량방정식, 에너지수지식 등이 필요하며 각 조건을 일반화하여 무차원화된 지배방정식을 구하기 위하여 사용된 무차원수는 다음과 같이 정의하였다.

$$X=\frac{x}{H},\ Y=\frac{y}{H},\ U=\frac{uH}{\upsilon},\ V=\frac{vH}{\upsilon},\ F_o=\frac{\alpha t}{H^2}$$

$$\tau=\frac{t\upsilon}{H^2},\ \theta=\frac{T-T_f}{\Delta T},\ \Pr=\frac{\upsilon}{\alpha},\ Gr=\frac{g\beta\Delta TH^3}{\upsilon^2}$$

여기서 $\Gamma=\frac{s}{H}$ 이며, 본 실험에서는 가열부의 온도가 계속 상승하게 되므로 스테판수는 다음과 같이 변형된다.

$$Ste=\frac{C_p\Delta T}{\Delta h_f},\quad \Delta T=\frac{q''H}{K}$$

$$Ste^*=\frac{C_pq''H}{K\Delta h_f} \qquad (1)$$

3. 실험 장치 및 방법

3.1 실험 장치

상변화 열전달 현상을 관측하기 위해 본 연구에서는 상변화물질(PCM)로 파라핀을 사용였으며, Table.1은 본 실험에서 사용된 파라핀의 물성치를 나타낸 표이다.

Table.1 Thermophysical properties of paraffin

Properties	Value
Melting Temperature	53.2 ℃
Thermal Conductivity	0.18 kcal/ hr℃sec
Density	863.03 kg/m³
Specific Heat	686.54 kcal/kg℃
Viscosity	1.00 m²/hr
Latent Heat of Fusion	57.74 kJ/kg
Thermal Expansion	0.001

Fig.1과 같이 정사각 테스트용기에 파라핀을 채워넣고 바깥용기에 지름이 4cm인 원형의 초음파 진동자를 바닥쪽에 4개, 옆면에 2개씩 장착되고 바깥용기와 테스트용기사이에 물을 넣은 뒤 끼워넣는다. 초음파 발생장치는 28KHZ의 주파수를 발생하는 발진기와 진동자를 사용하였다. 한쪽면을 220V-150W의 전기판히터(7cm× 7cm)를 설치하여 일정한 Heat Flux를 공급하고 소용되는 전력량을 산출하기 위해 전력측정기를 통하여 전력이 공급될 수 있도록 배선하였다.

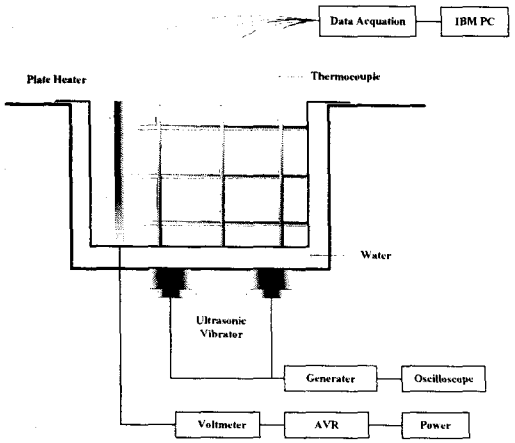


Fig.1 Schematic diagram for experimental apparatus

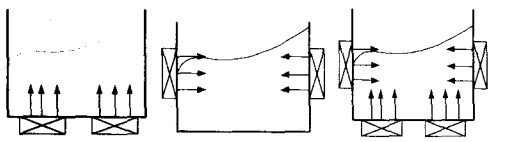
용해과정동안에 온도분포를 측정하기 위하여 격자를 제작하여 크로멜-알루멜(k-type)의 열전대를 지지하고 10채널로 각각 구성하며 용융시 온도 분포를 측정하였다. 또한 k-type의 열전대를 데이터 획득장치에 연결하고, 열전대를 통한 열전도를 최소화하기 위해 내열 실리콘과 절연테이프를 이용하여 구성하였다.

3.2 실험 방법 및 절차

응고된 파라핀을 녹인 다음 테스트 용기에 6.5cm 높이까지 넣고 실온에서 응고되어 약20℃일 때 히터판에 전류를 가하여 용해한다. 파라핀은 온도가 200℃가 넘어서면 탄소결합의 붕괴로 물성치가 변하기 쉽기 때문에 액상의 파라핀 온도가 200℃를 넘지 않도록 용융하면서 다음과 같은 Heat Flux를 각각 공급하여 실험한다.

①q" = 7831.19kcal/hr㎡

②q" = 12236.24kcal/hr㎡



(a) bottom (b) side (c) bottom+side

Fig.2 Position of vibrator

Fig.2와 같이 초음파 진동의 주파수는 28KHZ의 고정주파수를 사용하였으며 초음진동은 각각 밑부분, 옆면, 전체적(밑부분+옆면)으로 나누어서 실험을 수행하였다. 전력계에 의해 용해과정 동안의 소요된 전력량을 측정하고 파라핀의 상변화시 테스트 용기안의 온도 분포를 격자에 의해 지지되어 있는 thermocouple에 의해 검출되고 매 1분마다 데이터 획득장치에 저장되고 또한 용해과정동안에 열화상 카메라와 PIV시스템을 이용하여 용융과정 현상을 분석한다.

4. 결과 및 고찰

4.1 용해특성

4.1.1 히터 표면 열전달

히터표면에서 고상의 파라핀에 에너지가 전도되고 초기 용융상태가 되어 그 이후로부터 자연대류에 의해 고상 파라핀에 열에너지가 전도되어 용융시킨다. 용융현상이 진행되는 동안의 히터표면의 열전달 계수는 액상층의 확산으로 인한 열저항, 자연대류등의 요인으로 인해 영향을 받는다. 열전달을 방해하는 요소 중 가장 큰 영향을 미치는 대류 열저항은 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$R_{conv}=\frac{T_h-T_f}{q}=\frac{1}{hA} \qquad (2)$$

Heat Flux에서 초음파 진동이 주어진 경우 열저항이 자연용융 상태보다 부분적으로 약간 높게 나타났고 이는 열전달계수에 미소한 영향을 미친다. 히터 표면에서의 열전달계수, h와 Nusselt수, Nu는 히터표면의 온도분포와 상변화 물질의 물성치가 주어진 경우 구해질 수 있다. 열전달계수는 Heat Flux가 일정한 경우 식(3)으로 주어진다.

$$h=\frac{q''}{T_h-T_f}=\frac{q''}{\Delta T} \qquad (3)$$

히터표면에서의 열전달계수는 상변화물질의 전도영역과 대류영역을 고려하여 Nusselt수로 다시 주어질 수 있다.

$$Nu=\frac{q''H}{\Delta TK} \qquad (4)$$

무차원 시간인 FoSte*에 대한 히터표면에서의 열전달계수를 실험적을 구한것이다. 여기서 $Ra^{*0.25}$

는 자연대류가 발생할 경우 취해는 일반적인 값이다. Fig. 3에서 알 수 있는 것처럼 용융 초기에는 열전달계수가 급격히 감소하다가 서서히 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 용융 초기에 전도의 영향이 지배적이기 때문에 얇은 파라핀층을 사이에 두고 고-액상 인터페이스간에 많은 에너지가 이동하나 점차 액상층이 두터워짐에 따라 열저항이 빠르게 증가하여 에너지의 이동을 방해하기 때문이다. 어느 정도 용융이 진행되면 자연대류가 시작되고(FoSte*=0.3) 액상의 상하부의 혼합으로 다수의 에너지가 이동하고 용융 말기에는 액상의 전체적인 온도가 상승하게 되므로 이러한 영향의 상대적인 크기에 따라 열전달 속도가 결정된다. 자연용융의 경우나 초음파 진동이 가해진 경우든 상관이 없이 FoSte*=0.3 부근에서 자연대류가 시작된다는 것이다. 그리고 자연용융의 경우 Heat Flux에 관계없이 FoSte*가 5이하에서 용융이 완전히 끝남을 알 수 있다. 결국 고-액상 용융현상은 Fo, Ste*, Ra*의 함수인 것을 알 수 있다. Fig.3을 통하여 초음파 진동은 열전달계수에는 큰 영향을 미치지 않는다는 것을 알수 있다. 오히려 열전달에 영향을 미치는 큰 원인은 Heat Flux의 강도이며, 초음파 진동은 용융속도에 큰 영향을 미침을 알 수 있다. 열전달계수가 약간 감소한다. 그러나 용융시간에 있어서는 초음파 진동을 가한 경우가 그렇지 않는 경우보다 현저히 줄어듬을 알 수 있다.

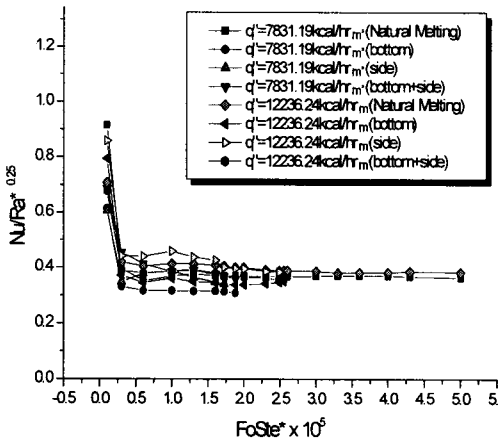


Fig. 3 Nusselt number variation on the heater surface with FoSte*

4.1.2 상변화 물질의 용융온도

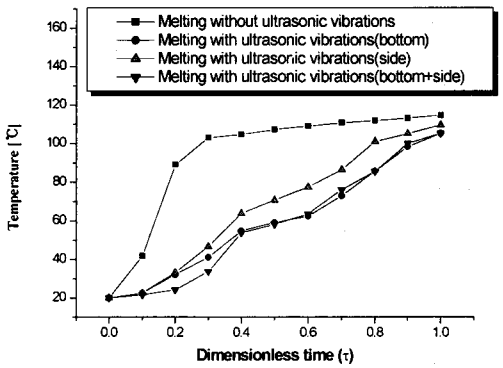


Fig.4 Temperature variations in sequence of Dimensionless time (q"=7831.19kcal/hrm²)

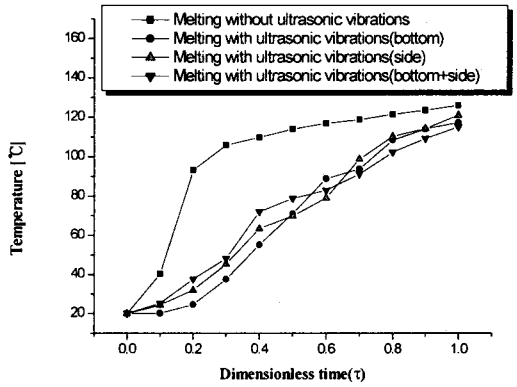


Fig.5 Temperature variations in sequence of Dimensionless time (q"=12236.24kcal/hrm²)

Fig.4와 Fig.5는 히터판에서 다음과 같은 두 Heat Flux (q" = 7831.19kcal/hrm², q" = 12236.24kcal/hrm²) 상변화물질에 초음파를 밑부분, 옆면, 전체(밑부분+옆면) 순으로 가하면서 용융되는 무차원시간에 대한 온도 분포를 도시화했다. 위의 온도분포는 초음파를 가한경우가 자연용융상태보다 용융온도가 낮게 형성되어 용융이 완료되는 것을 볼 수 있다.

Fig.6와 Fig.7 의 그림은 두 Heat Flux에서의 무차원 시간에 대한 열전달계수의 증가를 나타낸 그림으로 초기 고상영역 (τ =0.2) 부근에서 감소하여 액상영역 (τ =0.6)에서 급격히 증가하는 것을 볼 수 있다. 또한 초음파 가진 위치를 옆면에서 주었을 때 열전달계수의 증가폭이 크다는 것

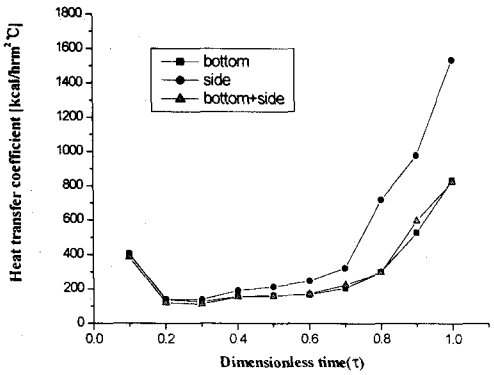


Fig.6 Augmentation of heat transfer coefficient (q" = 7831.19kcal/hr㎡)

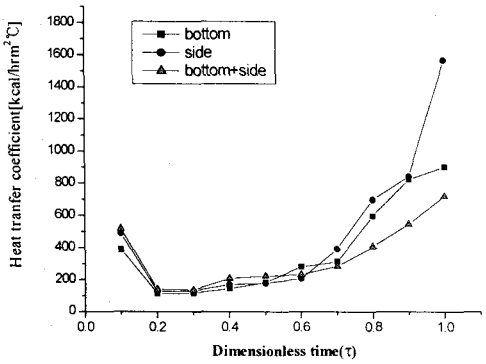


Fig.7 Augmentation of heat transfer coefficient (q" = 12236.24kcal/hr㎡)

은 밑면에서 가진했을 때는 초음파가 고상을 투과하지 못하지만 옆면에서는 초기 어느정도 액상부분이 존재하여 진동과 캐비테이션등의 영향을 받아 열전달을 향상시킨다. 또한 옆면과 밑면에서 동시 가진 했을 때는 주파수 감쇠효과로 인하여 낮게 나타난다.

Table.2는 본연구에서 주어진 각각의 Heat Flux와 각 위치에서의 초음파를 방사한 경우 총전력량과 용융완료시간을 측정한 결과이다. 또한 상변화가 상단부분부터 일어나서 밑부분에서 초음파를 가한 경우보다 옆면에서 가한 경우가 10여분 정도 용융시간이 단축된다는 것을 알 수 있었다.

Fig.8은 상변화물질을 초음파로 옆면에서 가진했을 때 열화상카메라로 촬영한 그림으로 강한 강제대류가 일어나고 있는 것을 볼 수 있다.

Table.2 Comparison of total consumed electricity for the overall melting process

Parameter	heater	U.V. device	Total consumed electricity	Melting time
q"=7831.19				
Natural Melting	287.4Wh	-	287.4Wh	332Min
bottom	73.6Wh	202.4Wh	276Wh	85Min
side	68.4Wh	188.1Wh	256.5Wh	79Min
bottom+side	72.7Wh	200Wh	272.7Wh	84Min
q"=12236.24				
Natural Melting	252.5Wh	-	252.5Wh	179Min
bottom	87.1Wh	161.9Wh	249Wh	68Min
side	78.2Wh	145.2Wh	223.4Wh	61Min
bottom+side	87.1Wh	161.9Wh	249Wh	68Min

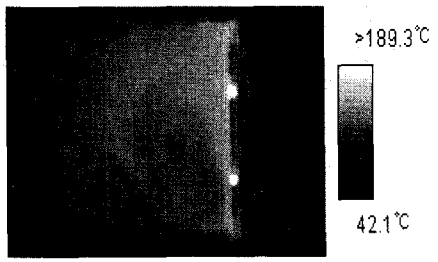


Fig.8 Oscillating fluid motion formed ultrasonic vibrations

파라핀의 온도 분포는 용기의 바닥면에서 가까운 지점일수록 온도변화가 서서히 일어나고 있어 상부의 파라핀의 온도보다 더욱 안정적이다 이는 최고 온도에 달하여 방향을 바꾸어 고상의 파라핀에 에너지를 빼앗겨가는 자연대류의 흐름 때문에 파라핀 상부에서는 온도 변화가 심하다는 것을 알 수 있고 중간부의 온도 변화중 온도 요동현상은 초음파의 진동으로 발생된 공동현상의 소멸로 인한 급격한 압력변화 때문으로 추정된다. 초음파 진동을 밑면에서 가했을 때 보다 옆면이나 전체(옆면+밑면)에서 가할 때가 온도 상승이 급하게 상승한다. 밑면에서 진동하는 초음파는 고상을 통과하지 못하여 유동대류에 영향을 주지 못한다. 그러나 옆면에서 초음파를 가할 경우에는 액상에 진동을 주어 대류현상을 강하게 작용시켜 상변화를 빠르게 하여 용융시간을 단축한다.

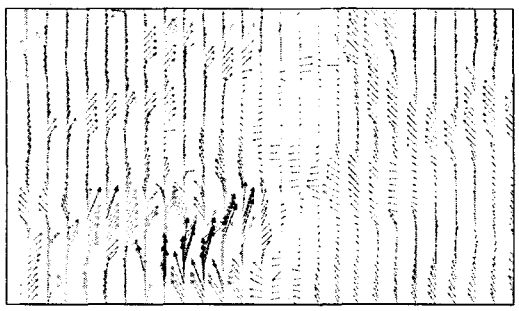


Fig.9 Typical velocity fild of flow the induced acoustic streaming by ultrasonic vibrations

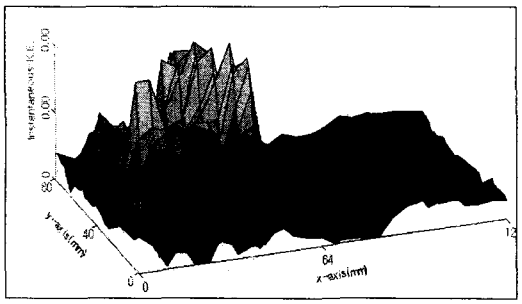


Fig.10 Typical K· E fild flow the induced acoustic streaming by ultrasonic vibrations

Fig.9과 10은 PIV system을 이용하여 용융시 초음파를 가진했을 때 속도성분과 운동에너지를 분석한 그림으로 acoustic streaming의 유형을 나타내고 있고, 속도성분의 mean velocity=0.0030 m/sec, max velocity=0.0982m/sec, min velocity =0.000m/sec로 분석되었다. 초음파 진동자 부분에서의 운동에너지가 높게 나타나 강한 유동이 일어나고 있는 것을 가시적으로 증명된다.

5. 결 론

본 연구에서는 자연 용융상태와 초음파를 각 위치에 따라 초음파 가진시 그 용융과정을 살펴보고, 파라핀의 온도 분포, 소요된 에너지량, 열전달을 촉진시키는 요소등을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 동일한 Heat Flux에서 용융시 초음파를 가진한 경우가 자연용융상태보다 온도분포가 낮게 나타나지만 열전달이 촉진되어 용융완료시간을 단축시킨다

2) 초음파 진동을 가한 경우 열저항이 다소 증가하여 히터표면에서의 열전달 계수를 다소 감소시키나 공동현상, 진동유동, 음향효과 등을 유발시켜 용융완료시간이 q"=7831.19, q"=12236.24 각각의 Heat Flux에서 147분, 118분이 단축되었다.

3) 자연용융인 경우 열전달에 영향을 미치는 것은 Heat Flux 강도이고, 초음파 진동은 용융속도에 큰 영향을 미친다.

4) q"=7831.19, q"=12236.24 각각의 Heat Flux에서 자연용융상태보다 각각 30.9Wh, 29.1Wh 에너지도 절감되고, 또한 고상의 밑면에 초음파를 방사하는 것보다 옆면 액상에 초음파를 방사하는 경우가 용융완료 시간이 5-7분 단축되었다.

5) 초음파가진시 열화상카메라와 PIV system을 이용하여 분석한 결과 agitation, acoustic streaming, cavitation, 강제대류등에 의하여 열전달이 향상된다.

참 고 문 헌

(1) Park,2000 "초음파 진동이 상변화 열전달에 미치는 영향에 관한 실험적 연구", 대학기계학회, 대한계학회 추계학술대회 논문집, pp297-303

(2) 박설현,2001 "초음파 진동이 상변화 열전달에 미치는 현상에 관한연구", 조선대학교 석사학위논문

(3) Park,2001 "Experimental Study on Accelerating Phase Change Heat Transfer", ASV6, pp445-446

(4) 오율권외 5명,2001"초음파가 가진된 밀폐용기내에서 용융특성"대한설비공학회 2001하계논문집,vol. 4, pp1203-1207

(5) R. Viskanta., 1985 : 『Natural convection effects in phase change heat transfer』, Hemisphere, Washington D.C.

(6) Gau, C. and Viskanta, R.,1986 : 『Melting and Solidification of a Pure Metal on a Vertical Wall』,J.of Heat Transfer, vol. 108,pp 204-209